DOI : 10.22034/jrenew.2023.186515

سال یازدهم، شماره اول، بهار و تابستان 1403، ص ص 80- 89

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

Online ISSN 2676-2994 print ISSN 2423-4931

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: 01/12/10

تاریخ پذیرش: 02/05/04

تحلیل سیستم‌های فتوولتاییک ادغام‌شده با نمای دوپوستهٔ ساختمان و تأثیر آن بر روی بار تهویه مطبوع ساختمان برای اقلیم گرم و نیمه‌خشک: مطالعه موردی شهر تهران

سیدمصطفی میرطبایی[1]، اصغر اشرف‌پور[2]، علیرضا مستمندی[3*]

1-استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

2-استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، زنجان، ایران

3-کارشناسی ارشد، مهندسی معماری، مؤسسه آموزش عالی حافظ شیراز، شیراز، ایران

*شیراز، صندوق پستی 7155936956، Alimos805@gmail.com

چکیده

افزایش نگرانی‌ها بابت کاهش منابع سوخت فسیلی در جوامع امروزی باعث گرایش بیشتر به انرژی‌های تجدیدپذیر شده است. ازاین‌بین، انرژی خورشیدی دردسترس‌ترین منبع تجدیدپذیر است. اغلب سلول‌های خورشیدی از بازدهی مطلوبی برخوردار نیستند. راهکار مؤثرتر برای حل این مشکل، افزایش کارایی ماژول‌های خورشیدی با ترکیب آن‌ها با سایر سیستم‌ها است. یکی از این سیستم‌ها نمای دوپوسته است. با ترکیب این سیستم با پنل‌های خورشیدی، فناوری جدیدی تحت عنوان سیستم‌های فتوولتاییک ادغام‌شده با نمای دوپوستهٔ ساختمان معرفی می‌شود. هدف از این پژوهش، تحلیل چند نوع از سیستم‌های فتوولتاییک ادغام‌شده با نمای دوپوستهٔ ساختمان برای مشاهده تأثیر آن بر روی بار تهویه مطبوع ساختمان و بهینه‌سازی پارامترهای دخیل در این سیستم برای اقلیم گرم و نیمه‌خشک است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که دمای داخل ساختمان با استفاده از نمای دوپوسته به‌علت انتقال حرارت بیشتر نمای دوپوسته، به‌طور میانگین در هر ماه دو درجه سانتی‌گراد کمتر از حالت ساده است. میزان سرمایش مصرفی درون ساختمان در حالت استفاده از نمای دوپوسته کمتر از حالت ساده است. در فصل تابستان به‌علت شدت تابش خورشیدی مناسب شهر تهران و نورگیری نمای دوپوسته، دمای درون ساختمان بالا رفته و نیاز به مصرف سرمایش بیشتری جهت تهویه مطبوع مناسب درون ساختمان است. از سوی دیگر، با استفاده از سلول‌های خورشیدی شفاف، به‌طور میانگین در هر ماه می‌توان 30 کیلووات ساعت انرژی الکتریکی تولید کرد. همچنین، استفاده از نمای دوپوسته باعث کاهش میزان مصرف سوخت در نیروگاه‌ها می‌شود که منجر به کاهش انتشار آلایندگی خواهد شد.

کلیدواژگان: انرژی خورشیدی، انرژی‌های تجدیدپذیر، نمای دوپوسته، تهویه مطبوع ساختمان، بهره‌وری انرژی، سیستم‌های فتوولتاییک

Analysis of photovoltaic systems integrated with the facade of two building shells and its effect on the air conditioning load of the building for hot and semi-arid climate: a case study of Tehran city

Seyed Mostafa Mirtabaei[1], Asghar Ashrafpour[2], Alireza Mostamandi[3*]

1- Asistant Professor, Mechanical Engineering, Shahrood Industrial University, Shahrood, Iran
2- Asistant professor, Civil Engineering, Islamic Azad University-Zanjan Branch, Zanjan, Iran
3-Master Architecture Engineering, Hafez Shiraz Institute of Higher Education, Shiraz, Iran
* P.O.B. 7155936956 Shiraz, Iran, Alimos805@gmail.com

Received: 1 March 2023 : Accepted: 26 July 2023

Abstract

In today's society, increasing concerns about the depletion of fossil fuel resources have led to a greater adoption of renewable energy sources. Among these, solar energy is the most widely available. However, most solar cells are not efficient enough. To overcome this problem, it is necessary to increase the efficiency of solar modules by combining them with other systems. One of these systems is the two-shell facade. By integrating photovoltaic systems into the facade of two building shells, the system combines with solar panels to introduce a new technology. The aim of this study is the optimization of various kinds of photovoltaic systems that are integrated into building facades, specifically in hot, semi-arid climates. The results show that the temperature inside the building using the two-shell facade is two

مالکیت معنوی این مقاله تحت گواهی بین المللی تخصیص 4 کریتیو کامنز محفوظ است

degrees Celsius lower than the simple case on average every month due to the greater heat transfer of the two-shell facade. The amount of cooling consumed inside the building is lower when using the two-shell facade than in the simple case. In the summer, due to the intensity of solar radiation suitable for the city of Tehran and the lighting of the facade of two skins, the temperature inside the building rises and more cooling is needed for proper air conditioning inside the building. On the other hand, using transparent solar cells, on average, 30 kilowatt-hours of electrical energy can be produced per month. Also, using two-shell facades causes less fuel to be consumed in power plants, reducing emissions.

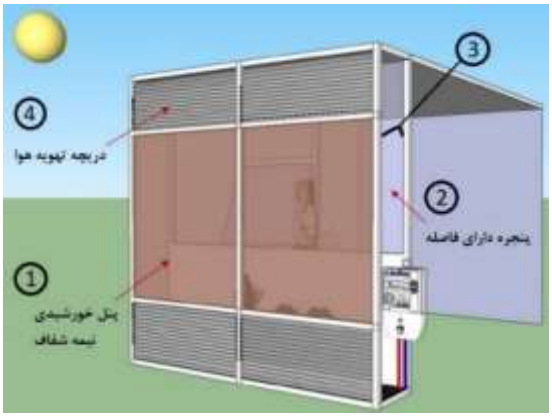
Keywords: Solar energy, renewable energies, two-shell facade, building air conditioning, energy efficiency, Photovoltaic systems.

1- مقدمه

با گذشت زمان و افزایش مصرف انرژی توسط انسان‌ها، منابع فسیلی کاهش یافته و افزایش تخریب محیط زیست در اثر استفاده بیش از حد از این منابع صورت گرفته است که از نشانه‌های این معضل بزرگ می‌توان به تغییر اقلیم و آلودگی هوا و گرمایش جهانی و ... اشاره کرد [1]. با پیشرفت فناوری و افزایش نگرانی‌ها در زمینهٔ کاهش منابع تجدیدناپذیر، جوامع امروزی به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر روی آورده‌اند [2]. به‌منظور حل این معضل، استفاده از سایر فناوری‌های سلول خورشیدی از جمله لایهٔ نازک و سلول‌های حساس به رنگ و... پیشنهاد می‌شود، بااین‌حال، هزینه‌های بالای تهیه و نصب و نوظهوربودن آن، از موانع پیش روی این فناوری هستند. یکی از راهکارهای بهتر و موثرتر، افزایش کارایی ماژول‌های خورشیدی از طریق ترکیب آن‌ها با سایر سیستم‌ها است [3]. یکی از این سیستم‌ها، سیستم فتوولتاییک ادغام‌شده با نمای دوپوستهٔ ساختمان است [4].

امروزه استفاده و بهره‌برداری از سیستم‌های فتوولتائیک در ترکیب با ساختمان، از ضرورت اجرایی و اهمیت به‌سزایی برخوردار است و همین مسأله باعث جذابیت بالای این موضوع برای طراحان و معماران شده است. شایان ذکر است که با افزایش شدت تابش پرتوهای خورشیدی، مقدار خروج نیروی الکتریکی سیستم‌های فتوولتائیک نیز افزایش می یابد و ازاین‌رو، سیستم‌های فتوولتائیک رابطه مستقیمی با میزان دریافت انرژی خورشیدی دارند (وفایی1389).

سیستم فتوولتاییک ادغام‌شده با نمای دوپوستهٔ ساختمان غالباً در نمای ساختمان تعبیه می‌شود و تأثیرات مفیدی برای محیط ساختمان به ارمغان می‌آورد. این سیستم علاوه بر ایجاد فاصله‌ای هوایی بین محیط بیرون و داخل و اثرگذاری بر کاهش مصرف انرژی، همچنین از مزایای دیگری از جمله پیش‌گرمایش و کاهش آلودگی صوتی و ... نیز برخوردار است. با ترکیب این سیستم با ماژول‌های خورشیدی و تأمین انرژی الکتریکی از طریق به‌کارگیری آن‌ها، فناوری جدیدی به‌نام نمای دوپوستهٔ فتوولتائیک معرفی می‌شود. به‌طور اختصار، سیستم نمای دوپوستهٔ فتوولتائیک از اجزای زیر تشکیل شده است (شکل 1): 1- لایهٔ خارجی: شیشهٔ معمولی یا بهره‌مندی از سلول خورشیدی نیمه‌شفاف 2- لایهٔ داخلی: پنجرهٔ بازشو 3- فاصلهٔ هوایی بین دو لایهٔ داخلی و خارجی 4- مجاری تهویهٔ هوا (در برخی سیستم‌ها، ادغام‌شده با ماژول خورشیدی).



شکل 1 شمایی از سیستم نمای دوپوستهٔ فتوولتائیک که با سلول خورشیدی نیمه‌شفاف ادغام‌شده

طراحان معمولاً طراحی خورشیدی را نوعی فرصت می‌دانند. به‌بیانی دیگر، در صورت انجام‌گیری معماری ساختمان برابر با شرایط ایمنی و محیطی، شرایط ساختمان به مرز آسایش ساکنین نزدیک خواهد شد و در صورت ترکیب متناسب سیستم فتوولتوئیک با ساختمان نیز نتیجهٔ کار بهتر و بازده انرژی ساختمان بسیار بیشتر خواهد شد (پراساد، ۲۰۰۵). گفتنی است، در صورت عدم تناقض کاربرد سیستم‌های فتوولتائیک با سیستم‌های غیرفعال خورشیدی و هم‌سازبودن دو سیستم، کاهش مصرف انرژی و کنترل آن به بهترین شکل ممکن انجام خواهد گرفت، به‌طوری‌که درصورت ترکیب مطلوب سیستم فتوولتائیک در پوشش ساختمان، هم امکان جلوگیری از نفوذ آفتاب و هم تولید برق مورد نیاز برای مصرف انرژی فراهم می‌شود (رندال، ۲۰۰۳).

ترکیب سیستم‌های خورشیدی فتوولتاییک-حرارتی سبب تسهیل در تبدیل هم‌زمان تابش خورشیدی به انرژی الکتریکی و گرمایی شده است. گیوپتا و تیواری[1] [5] در سال 2017 به بررسی ساختمان حرارتی فتوولتائیک نیمه‌شفاف یکپارچه پرداخته‌اند. در این پژوهش، از یک مخزن آب به‌عنوان ذخیره‌ساز حرارتی استفاده شده است که در طول روز گرمای خورشید را جذب کرده و در طول شب حرارت را آزاد می‌کند. جاسازی این مخزن آب سبب کاهش نوسانات دمایی، کاهش بار حرارتی ساختمان و ایجاد آسایش حرارتی می‌شود. از سوی دیگر، افزایش مقدار آب موجود در مخزن از 0 تا 600 کیلوگرم، منجر به کاهش 20/39 درصدی بار حرارتی، افزایش 3/8 درصدی راندمان الکتریکی در نتیجهٔ کاهش 9 درجه‌ای دمای سل خورشیدی و در نهایت، افزایش اگزرژی حرارتی ماهانه شد.

[1] N. Gupta and G. N. Tiwari, 2017

در سال‌های اخیر، فناوری‌های جدیدی برای نمای ساختمان در راستای کاهش تلفات حرارتی، فراهم‌سازی سایهٔ لازم، آسایش حرارتی ساکنین و بهبود کیفیت روشنایی ساختمان، طراحی و پیشنهاد شده‌اند. از این بین، فناوری نمای دوپوستهٔ ساختمان به‌عنوان راه‌حل موثر برای کنترل برهم‌کنش‌های محیط بیرون و داخل پیشنهاد شده است. این سامانه در جلوی نمای اصلی ساختمان تعبیه می‌شود. این نمای دوپوسته را یک فاصلهٔ هوایی از هم جدا کرده است. این فاصلهٔ هوایی موجود بین محیط بیرون و داخل، علاوه بر تأثیرگذاری در کاهش مصرف انرژی، همچنین سبب پیش‌گرمایش و کاهش آلودگی صوتی و... نیز می‌شود [6]. اخیراً به‌عنوان بخشی از مطالعات در زمینهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر، پژوهش‌هایی در زمینهٔ سیستم‌های فتوولتاییک ادغام‌شده با نمای دوپوستهٔ ساختمان انجام گرفته‌اند که هدف آن‌ها کاهش مصرف انرژی از طریق بهبود عملکرد پوشش ساختمان به‌وسیلهٔ نمای دوپوستهٔ ساختمان و تولید انرژی الکتریکی از پنل‌های خورشیدی است [7, 8]. با ادغام سیستم فتوولتاییک با نمای دوپوسته، این سیستم می‌تواند به یک سیستم تولید انرژی تجدیدپذیر و جدید تبدیل شود. از سوی دیگر، در این سیستم، عملکرد پنل خورشیدی بهبود یافته و نقایصی از جمله افزایش گرمای بیش از حد ماژول کاهش یافته‌اند [9]. در صورت یکپارچه‌سازی سیستم فتوولتائیک با ساختمان و فراهم‌شدن امکان تهویه، استفاده از گرمای خورشید در فصل زمستان، استفاده از نور طبیعی، بهره‌مندی از دید به مناظر خارج و برخی موارد دیگر، بالاترین سطح خروجی از این سیستم به‌دست می‌آید و این مهم تنها زمانی میسر می‌شود که سیستم های فعال و غیرفعال خورشیدی موجود در یک ساختمان با یکدیگر هماهنگ و منطبق شوند (وفایی، 1389).

بنابر نتایج مطالعات قبلی، تهویه محفظه پشتی در صورت مناسب‌بودن دمای تهویه، کاهش دمایی 15 تا 20 کلوین و به‌دنبال آن، افزایش تولید توان و کاهش ریسک ایجاد نقاط فوق گرم را برای ماژول به ارمغان می‌آورد [10, 11]. لو و همکاران[1] [12] در سال 2013 سیستم نمای دوپوستهٔ فتوولتائیک با مجاری تهویه مختلف را طراحی کردند. برای تحلیل و بررسی پارامترهایی چون ضریب افزایش حرارت خورشیدی، مقدار شاخص عایق حرارتی، شار حرارتی و دمای محیط بیرون، داخل و پنل خورشیدی تحت حالات مختلف تهویه (تهویه معمولی، تهویه طبیعی و بدون تهویه)، از تصویربرداری حرارتی مادون قرمز استفاده شده است. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، در مقایسه با حالات مختلف عملکردی، حالت تهویه عادی نه تنها نرخ افزایش گرما را کاهش می‌دهد بلکه دمای داخل و به‌دنبال آن، دمای پنل خورشیدی را نیز کم می‌کند. مقدار شاخص پنل خورشیدی برای حالت تهویه عادی بیش از دو حالت دیگر است که خاصیت عایق حرارتی ضعیفی دارد. اعمال حالت دریچه‌های ورودی و خروجی بسته و پنجره داخلی باز در طول روز افتابی در زمستان مناسب است. حالت بدون تهویه جهت کاهش اتلاف حرارتی برای روزهای ابری و شب‌های زمستانی توصیه می‌شود. پنگ و همکاران[2] [13] در سال 2017 به بررسی و مقایسه دو سیستم نمای دوپوستهٔ فتوولتائیک و سیستم فتوولتاییک ادغام‌شده با شیشه دولایهٔ عایق پرداختند. تفاوت‌های اساسی این دو سیستم از نظر ساختاری و هندسی بدین صورت است که سیستم فتوولتاییک ادغام‌شده با شیشهٔ دولایهٔ عایق نسبت به نمای دوپوستهٔ فتوولتائیک فاصله هوایی کمتری دارد و نیز فاقد مجاری ورودی و خروجی هوا است. ضریب افزایش گرمایش خورشیدی برای سیستم نمای دوپوستهٔ فتوولتاییک و فتوولتاییک ادغام‌شده با شیشهٔ دولایه عایق به‌ترتیب برابر با 0/152 و 0/238 است. همچنین، لو و همکاران [12] در سال 2016 در پژوهشی دیگر با شبیه‌سازی مدل تحقیقاتی قبلی در نرم‌افزار انرژی پلاس و با درنظرگیری ادغام سلول خورشیدی نیمه‌شفاف در پوشش خارجی سیستم نمای دوپوستهٔ فتوولتائیک به نتایج قابل توجهی دست یافتند. نتایج به‌دست‌آمده به این شرح است: توانایی تولید انرژی الکتریکی در سال به ازای سالانه 65 کیلووات/ساعت واحد سطح، کاهش 15٪ بار خنک کاری، افزایش 3 درصدی انرژی الکتریکی خروجی ماژول، محدودهٔ بهینه عمق فاصلهٔ هوایی 600-400 میلی‌متر، با در نظر گرفتن عمق 600 میلی‌متر، منجر به صرفه‌جویی 15٪ در مصرف برق سالیانه، صرفه‌جویی 35٪ در مصرف برق سالیانه با درنظر گرفتن تهویه طبیعی و ذخیره 50٪ انرژی الکتریکی به‌منظور روشنایی ناشی از تابش در فصل زمستان است. پنگ و همکاران [14] توسعه یک روش و مدل شبیه‌سازی برای ارزیابی عملکرد کلی انرژی یک نمای دوپوستهٔ فتوولتائیک نیمه‌شفاف تهویه‌شده پرداختند. نتایج شبیه‌سازی ساعتی دما، افزایش گرما، روشنایی و توان خروجی پنل خورشیدی با اطلاعات اندازه‌گیری‌شده مقایسه شد. نتیجه این مقایسه نشانگر مطابقت بین اطلاعات شبیه‌سازی و تجربی است. خطای محاسبه‌شده بین توان متناوب خروجی ماهانه شبیه‌سازی شده و اطلاعات اندازه‌گیری‌شده 2/47٪ بود که نشان‌دهندهٔ دقت شبیه‌سازی است. نتایج اعتبارسنجی نشان می‌دهد که مدل توسعه یافته شبیه‌سازی‌شده می‌تواند عملکرد انرژی سیستم نمای دوپوستهٔ فتوولتائیک نیمه‌شفاف را با توجه به تاثیرات مهم آن روی مصارف انرژی ساختمان چون گرمایش، سرمایش، روشنایی و همچنین توانایی تولید توان، شبیه‌سازی کند. یون و همکاران[3] [15] در سال 2019 با طراحی و ساخت و بهینه‌سازی سیستم نمای دوپوستهٔ فتوولتائیک دست به پژوهشی نوآورانه زدند. نتایج حاصل از این بررسی به شرح ذیل است: اختلاف دمای 12 درجه سانتی‌گراد بین نمای دوپوستهٔ ساختمان و محیط بیرون در زمستان، کاهش دمای دیوار و هوای نمای دوپوسته ساختمان به‌ترتیب به اندازه 2 و 0/5 درجه، میانگین کاهش 10 درصدی مصرف انرژی سرمایشی، زاویه عملکردی بهینه دریچه‌های پنل خورشیدی در زمستان برابر با 10 تا 20 درجه و در تابستان برابر با 30 درجه، تحلیل مقادیر عرض سیستم نمای دوپوستهٔ ساختمان و عبور اشعه نزدیک مادون قرمز به‌عنوان پارامترهای طراحی دارای بیشترین تاثیر در بار سرمایشی و گرمایشی. فاضل‌پور و همکاران[4] [16] در سال 2019 با شبیه‌سازی سیستم نمای دوپوستهٔ ساختمان توسط نرم‌افزار دیزاین بیلدر به تحلیل این سیستم با توجه به ادغام آن با پنل‌های خورشیدی و مواد ذخیره‌کنندهٔ انرژی و مقایسه این سیستم‌های ادغامی در شهرهای مختلف ایران با پوشش‌های شیشه‌ای مختلف پرداختند. پارامترهای درنظرگرفته‌شده در این بررسی شامل موارد زیر است: تولید و مصرف سالیانه انرژی، بار گرمایش و سرمایش، عمق فاصله هوایی و جهت‌گیری جغرافیایی ساختمان. نتایج قابل توجه به‌دست‌آمده به شرح زیر است: نقش به‌سزای مواد ذخیره‌کنندهٔ انرژی در

[1] Lu L et al., 2013

[2] Jinqing Peng et al., 2017

[3] J. Yoon et al., 2019

[4] F. Fazelpour et al., 2019

کاهش بار سرمایشی ساختمان و همچنین کاهش مصرف انرژی ساختمان با ادغام مواد ذخیره‌کنندهٔ انرژی با دیوارهٔ غربی. چو و همکاران [1] [17] در سال 2019 با ساخت، طراحی و شبیه‌سازی سیستم‌های فتوولتاییک ادغام‌شده با نمای دوپوستهٔ ساختمان در نرم‌افزار انرژی پلاس به تحلیل آن برای کاربرد در ساختمان‌های بلند (25 طبقه) پرداخته‌اند. نتایج به‌دست‌آمده به این شرح بود: در فصل تابستان، طبقات بالا بار گرمایش بیشتری نسبت به طبقات پایین تجربه می‌کنند (نتیجه عکس برای بار سرمایش). با نصب سیستم نمای دوپوستهٔ ساختمان، طبقه پنجم با 29/8٪ و طبقه آخر با 30٪ به‌ترتیب کمترین و بیشترین ذخیره‌سازی انرژی گرمایی را دارا هستند. در فصل زمستان، هوای داخل سیستم نمای دوپوستهٔ ساختمان اختلاف دمایی 21 تا 32 درجه سانتی‌گراد با هوای محیط بیرون با بازه دمایی بین 11/8- تا 5/6- درجه سانتی‌گراد را تجربه می‌کند. بار گرمایش، با نصب سیستم نمای دوپوستهٔ ساختمان کاهش و با افزایش طبقات افزایش می‌یابد. سیستم‌های پنل خورشیدی از جمله فناوری‌های در حال پیشرفت برای جذب انرژی خورشیدی است. انواع سیلیکنی آن که مرسوم‌ترین سلول‌های خورشیدی هستند، متاسفانه از بازدهی بالایی برخوردار نیستند.

ضرورت مورد نظر در اجرای این پژوهش، افزایش کارایی این سیستم‌ها با ترکیب آن‌ها با دیگر سیستم‌ها است؛ به‌ویژه، سیستم DSF که در این پژوهش به آن پرداخته خواهد شد. از سوی دیگر، یکی دیگر از معضلاتی که جوام ع امروزی و به‌ویژه کلان شهرها با آن دست‌وپنجه نرم می‌کنند، افزایش مصرف برق است که در اثر افزایش بار سرمایشی و گرمایشی ساختمان به‌وجود می‌آید. در مطالعه (مقربیه و همکاران) [24] تاکید به اجرای سیستم های فتوولتائیک همسو با طراحی ساختمان و ضرورت اجرای آن در طراحی ساختمان‌های آینده از چندین منظر مورد بررسی قرار گرفته است، به‌طوری‌که در مبحث انرژی و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی یکی از مهمترین دلایلی که می‌تواند علاوه بر رعایت دیدگاه محیط زیستی و حفاظت از آن به کاهش مصرف انرژی نیز بینجامد، به‌کارگیری سیستم‌های فتولتائیک است (مقربیه و همکاران، 2021).

یکی دیگر از ضرورت‌های این پژوهش، تحلیل تأثیر سیستم‌های نمای دوپوستهٔ فتوولتائیک بر بارهای سرمایش و گرمایش ساختمان جهت بهبود و کاهش مصرف برق می‌باشد. هدف از این پژوهش، تحلیل چند نوع از سیستم‌های نمای دوپوستهٔ فتوولتائیک برای مشاهده تأثیر آن‌ها بر بار تهویه مطبوع ساختمان و بهینه‌سازی پارامترهای دخیل در این سیستم برای اقلیم‌های گرم و خشک است. همان‌طور که در تعریف مسئله بیان شد، یک سیستم نمای دوپوستهٔ فتوولتائیک از 4 قسمت (جدار خارجی و داخلی، فاصله هوایی و مجاری تهویه بالا و پایین) تشکیل شده است. انواع سیستم‌هایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار خواهد گرفت شامل موارد زیر هستند: 1- نمای دوپوستهٔ فتوولتائیک به‌کاررفته در جدارهٔ خارجی سلول خورشیدی نیمه‌شفاف 2- نمای دوپوستهٔ فتوولتائیک که در آن، دریچه‌های ورود و خروج هوا با ماژول خورشیدی ادغام شده‌اند. این تحلیل شامل شبیه‌سازی این سیستم در یکی از نرم‌افزارهای کاربردی، مقایسه این سیستم‌ها از دیدگاه میزان افزایش کارایی سلول‌های خورشیدی به‌کاررفته در آن‌ها، میزان تأثیر بر روی بار سرمایش و گرمایش ساختمان و بهینه‌سازی و تجزیه‌وتحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر در این سیستم‌ها می‌باشد. در این پژوهش به مقایسه دو سیستم نمای دوپوستهٔ فتوولتائیک از نظر تأثیر هر یک از آن‌ها بر بهبود و کاهش بار گرمایشی و سرمایشی ساختمان و تحلیل پارامترهای موثر برای آب و هوای گرم و نیمه‌خشک پرداخته خواهد شد.

2- مواد و روش ها

در این بخش، پیش‌نیازهای لازم برای انجام پژوهش حاضر و ابزارها و روش‌های به‌کاررفته تشریح می‌شوند.

2-1 محدوده مورد مطالعه

در این پژوهش، به تحلیل و بررسی شهر تهران با برخورداری از اقلیم آب‌وهوایی گرم و نیمه‌خشک پرداخته‌ایم. سپس، به بررسی ساختمان‌های دوپوسته در مقایسه با ساختمان‌ها و ابعاد ساختمان طراحی‌شده و به‌منظور مقایسه ساختمان‌های دوپوسته و ساختمان معمولی پرداخته شده است. شهر تهران در نواحی مرکزی کشور ایران قرار دارد. بر اساس آمار، جمعیت این شهر در سال ۱۳۹۵، 8694000 نفر بوده و بزرگ‌ترین شهر ایران است. شمال شهر تهران به‌دلیل ارتفاع بیشتر، خنک‌تر از دیگر مناطق شهر است. همچنین بافت نامتراکم، وجود باغ‌های کهن، بوستان‌ها، فضای سبز حاشیه بزرگراه‌ها و کم‌بودن فعالیت‌های صنعتی در شمال شهر در خنک‌تر بودن هوای مناطق شمالی به‌میزان میانگین ۲ تا ۳ درجه سانتی‌گراد نسبت به مناطق جنوبی شهر مؤثر بوده‌اند. گستره شهر تهران در پهنه‌ای بین دو وادی کوه و کویر و در دامنه‌های جنوبی البرز بوده و مساحت آن ۷۳۰ کیلومترمربع است. از نظر جغرافیایی نیز در ۵۱ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۳ دقیقه طول خاوری و ۳۵ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۴ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. گستره کنونی تهران از ارتفاع ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ متری از سطح دریا امتداد یافته است؛ این ارتفاع از شمال به جنوب کاهش می‌یابد. برای مثال، ارتفاع در میدان تجریش، در شمال شهر حدود ۱۳۰۰ متر و در میدان راه‌آهن واقع در ۱۵ کیلومتر پایین‌تر از آن، ۱۱۰۰ متر است [18, 19].

2-2 ابزار پژوهش

ابزار به‌کاررفته در این پژوهش به اقتضای هدف مطالعه، نرم‌افزار Design Builder است.

نرم افزار Design Builder برای مدل‌سازی ساختمان از جنبه‌های مختلف مثل فیزیک ساختمان (مصالح ساختمانی)، معماری ساختمان، سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی، سیستم روشنایی و غیره کاربرد داشته و قابلیت مدل‌سازی همه جنبه‌های ساختمان را دارد و به‌جز مدل‌سازی بار گرمایشی و سرمایشی ساختمان، مصارف مختلف انرژی ساختمان از قبیل مصرف انرژی گرمایشی، سرمایشی، روشنایی، لوازم خانگی، آب گرم مصرفی و غیره را به‌صورت دینامیک مدل‌سازی می‌نماید. این نرم‌افزار همچنین قابلیت محاسبه میزان روشنایی روز و حتی مدل‌سازی CFD را نیز دارد. نرم‌افزار مدل‌سازی دیزاین بیلدر با استفایافت و اتلاف و مصرف انرژی را دقیقاً بر اساس شرایط اقلیمی محل قرارگیری ساختمان انجام می‌دهد. نقش موثر این نرم‌افزار زمانی روشن‌تر می‌گردد که در طی مراحل طراحی و مدلسازی ساختمان، با اعمال تغییرات کوچک و بزرگ در طراحی، تاثیرات این تغییرات

[1] S. Cho et al., 2019

در میزان مصرف و یا صرفه‌جویی انرژی ساختمان و یا هریک از فضاها مشخص می‌شود. موتور مدل‌سازی این نرم‌افزار، EnergyPlus است که توسط دپارتمان انرژی آمریکا ساخته شده و از دقیق‌ترین نرم‌افزارهای موجود است. نرم‌افزار دیزاین بیلدر علاوه بر برخورداری از دقت بالای محاسباتی، در مقایسه با سایر نرم‌افزارهای مدل‌سازی موجود از قابلیت‌های زیادی نیز برخوردار است.

2-3 روش کار

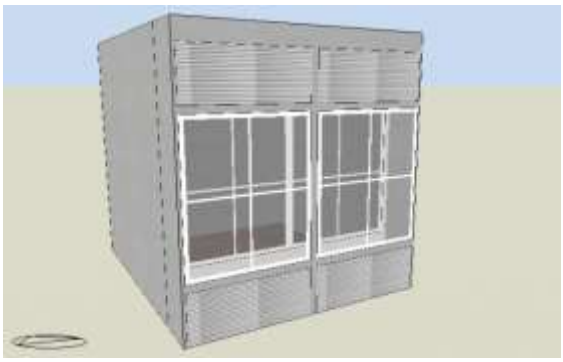
به‌طور کلی برای انجام این پژوهش میزان مصرف انرژی یک ساختمان در تهران با نمای دوپوسته و ترکیب آن با پنل های فتوولتاییک مورد بررسی قرار گرفته است، این کار در ابتدا به وسیله ی داده های آب و هوایی و شبیه سازی یک اتاق انجام گرفت، سپس، مولفه هایی مانند روشنایی ، سرمایش، گاز مصرفی، میزان انتشار کربن دی اکسید و سایر موارد در دو حالت با استفاده از نمای دوپوسته و بدون استفاده از نمای دوپوسته بررسی گردید.

در بیشتر سال‌ها، فصل زمستان نیمی از کل بارش‌های سالانه تهران را تأمین می‌کند. اسفند پرباران‌ترین ماه سال است و حدود یک‌پنجم از بارش سالانه در آن صورت می‌گیرد. تابستان نیز کم‌باران‌ترین فصل و شهریور خشک‌ترین ماه سال در تهران است. میانگین بارش سالانه شهر در مناطق شمال و جنوب گاهی بسیار تفاوت دارد. در محدوده تهران بین ۲۰۵ تا ۲۱۳ روز هوای صاف تا کمی ابری وجود دارد [20]. در جدول 2 مشخصات ساختمان طراحی شده در نرم افزار دیزاین بیلدر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که طول ساختمان برابر 2.32 متر، عرض ساختمان 2.3 متر و ارتفاع ساختمان نیز 2.5 متر در نظر گرفته شده است. همچنین مشخصات سلول خورشیدی استفاده شده بر روی این ساختمان نیز نشان داده شده است. ضخامت پنل خورشیدی شفاف در نظر گرفته 0.008 متر، عرض پنل خورشیدی 1.1 متر و طول پنل خورشیدی 1.3 متر می‌باشد.

جدول 2 مشخصات ساختمان و پنل‌های خورشیدی در نظر گرفته شده در نرم‌افزار دیزاین بیلدر

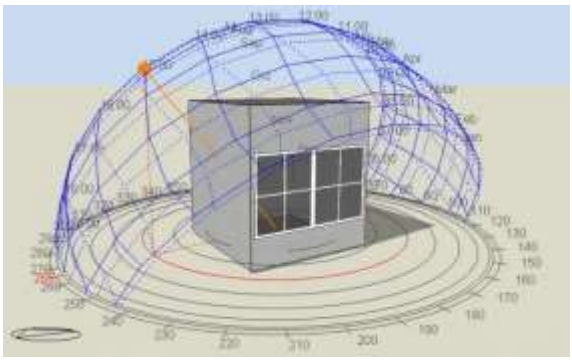
پارامتر	مقدار (متر)
طول اتاق	2.32
عرض اتاق	2.3
ارتفاع اتاق	2.5
عرض سلول خورشیدی	1.1
طول سلول خورشیدی	1.3
ضخامت سلول خورشیدی	0.008
عرض لوور	1.1
طول لوور	0.45
عمق حفره جریان هوا	0.4
نسبت دیوار به پنجره	0.6

در شکل 2 ساختمان طراحی شده با دوپوسته در نرم‌افزار دیزاین بیلدر نشان‌داده شده است. ابعاد این ساختمان در جدول 2 بیان شده است.



شکل 2 ساختمان دوپوسته طراحی‌شده

در شکل 3 دیاگرام مسیر خورشیدی بر روی ساختمان طراحی شده نشان‌داده‌شده است.



شکل 3 دیاگرام مسیر خورشیدی بر روی ساختمان طراحی‌شده

جدول 1 مشخصات آب‌وهوایی شهر تهران[18, 19]

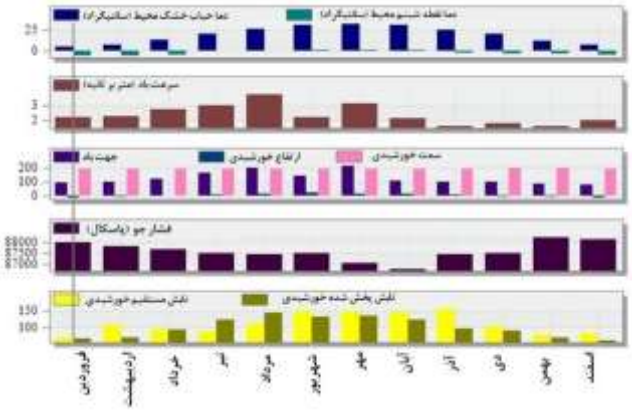
داده‌های اقلیم تهران، بلندی: ۱۵۴۸٫۲ متر، ۱۹۸۸–۲۰۰۵

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	سال
میانگین بیش‌ترین دما °C	۲۰٫۱	۸٫۱	۱۲٫۹	۱۹٫۸	۲۵٫۰	۳۱٫۲	۳۳٫۹	۳۳٫۵	۲۹٫۳	۲۲٫۴	۱۴٫۳	۸٫۶	۲۰٫۴

میانگین کم‌ترین °C	−۱٫۵	−۰٫۲	۴٫۰	۹٫۸	۱۴	۱۹٫۶	۲۲٫۶	۲۱٫۹	۱۷٫۵	۱۱٫۶	۵٫۴	۱٫۰	۱۰٫۴۸
میزان بارندگی (mm)	۶۳٫۱	۶۶٫۵	۸۳٫۳	۵۰٫۱	۲۷٫۱	۴٫۰	۴٫۲	۳٫۲	۳٫۴	۱۶٫۵	۴۱٫۳	۶۶٫۳	۴۲۹
میانگین روزهای بارانی	۱۲٫۳	۱۰٫۹	۱۲٫۳	۱۰٫۰	۸٫۹	۳٫۳	۳٫۴	۱٫۶	۱٫۳	۵٫۸	۸٫۶	۱۰٫۷	۸۹٫۱
میانگین روزهای برفی	۸٫۹	۶٫۶	۲٫۵	۰٫۱	۰٫۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰٫۶	۴٫۹	۲۳٫۷
درصد رطوبت	۶۷	۵۹	۵۳	۴۴	۳۹	۳۰	۳۱	۳۱	۳۳	۴۴	۵۷	۶۶	۴۶٫۲
میانگین روزانه ساعت‌های تابش آفتاب	۱۳۷٫۲	۱۵۱٫۱	۱۸۶٫۰	۲۱۹٫۱	۲۷۹٫۸	۳۲۸٫۷	۳۳۶٫۶	۳۳۶٫۸	۳۰۰٫۵	۲۴۶٫۸	۱۶۹٫۴	۱۳۴٫۱	۲۰۸۲۶٫۱

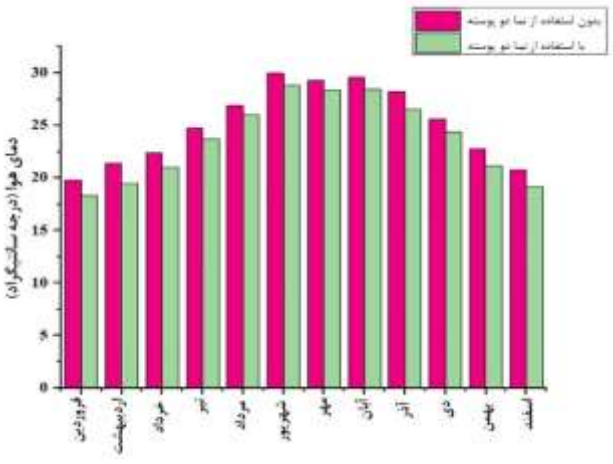
3- نتایج

در شکل 4 میزان فشار اتمسفر، جهت باد، سرعت باد، میزان تابش مستقیم، میزان تابش پخش شده، دما نقطه شبنم در خارج ساختمان و دما حباب خشک در خرج ساختمان نشان‌داده‌شده است. مشاهده می‌شود که در فصول سرد سال دما نقطه شبنم در خارج ساختمان زیر صفر درجه است و در فصول گرم سال دما نقطه شبنم بیش از صفر درجه است. همچنین دما حباب خشک در فصول گرم سال، در خارج ساختمان در حدود 25 درجه سانتیگراد است و در فصول سرد سال دما بین 4 تا 10 درجه ساتیگراد است. سرعت باد در ماه می برای شهر بیرجند به بیشترین مقدار خود می‌رسد، که برابر 3.8 متر بر ثانیه است. همچنین کمترین میزان سرعت باد در ماه‌های سپتامبر، اکتبر و نوامبر که برابر با 1.5 متر بر ثانیه است. میزان فشار اتمسفر در ماه اگوست به کمترین مقدار خود که برابر با 87 کیلوپاسکال است، می‌رسد و بیشترین مقدار فشار اتمسفر در ماه‌های ژانویه، نوامبر و دسامبر رخ می‌دهد که مقدار آن 88 کیلوپاسکال است. میزان تابش خورشید در فصل تابستان بیشترین مقدار خود یعنی 150 کیلووات ساعت را دارد که نشان از پتانسیل بالای شهر بیرجند برای استفاده از سلول‌های خروشیدی دارد و کمترین میزان تابش خورشیدی در فصول سر سال رخ می‌دهد که میزان آن برابر با 70 تا 80 کیلووات ساعت است.



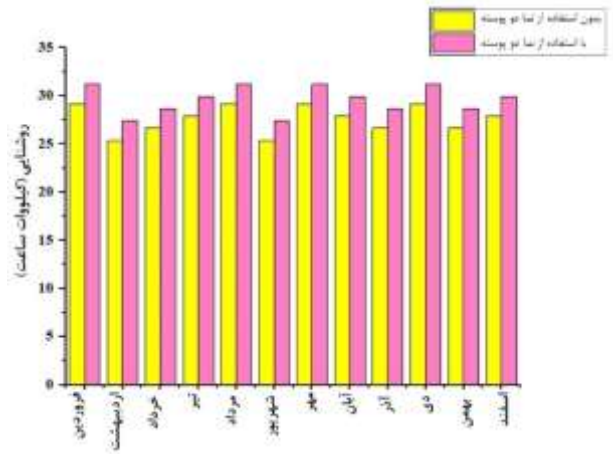
شکل 4 اطلاعات آب‌وهوایی تهران

در شکل 5 دما داخلی ساختمان در حالت استفاده از نمای دوپوسته و در حالت بدون استفاده از نمای دوپوسته نشان‌داده‌شده است. مشاهده می‌شود که اگر از نمای دوپوسته در ساختمان استفاده شود و باتوجه‌به نتایج مدل‌سازی صورت‌گرفته، به‌طور میانگین در هر ماه دما درون ساختمان 2 درجه کمتر از حالت بدون استفاده از نما دوپوسته می‌باشد. گاهی در فصول سرد سال این اختلاف دما تا 3 درجه سانتیگراد نیز خواهد رسید. این نمودار نشان می‌دهد که نمای دوپوسته انتقال حرارت بیشتری نسبت به استفاده از مصالح ساختمانی مانند اجر و گچ دارد.



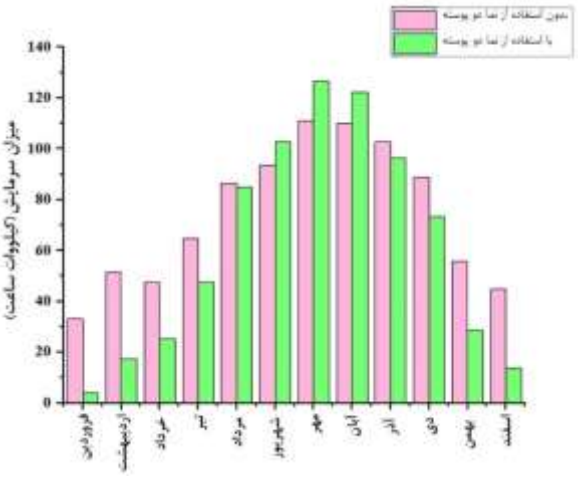
شکل 5 دما داخلی ساختمان با استفاده از نمای دوپوسته و حالت ساده

در شکل 6 میزان روشنایی درون ساختمان برای دو حالت استفاده از نمای دوپوسته و بدون استفاده از نمای دوپوسته نشان‌داده‌شده است. مشاهده می‌شود که در تمامی ماه‌های سال میزان روشنایی درون ساختمان با استفاده از نمای دوپوسته بیشتر است که این مورد یکی از مزایای مناسب استفاده از نمای دوپوسته می‌باشد. از طرفی نمای دوپوسته می‌تواند قسمتی از نور را از خود عبور دهد؛ اما در حالت ساده نور نمی‌تواند از دیوار ساختمان عبور کند پس نمای دوپوسته سبب افزایش نورگیری ساختمان خواهد شد.



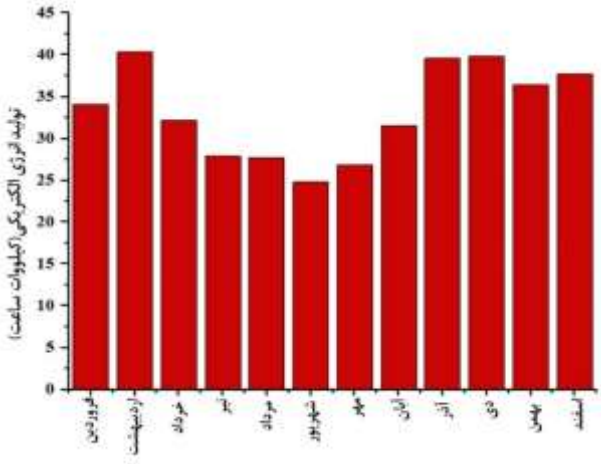
شکل 6 نمودار روشنایی درون ساختمان در حالت نمای دوپوسته و ساده

در شکل 7 نمودار میزان سرمایش مصرفی ساختمان بر حسب ماه‌های مختلف برای دو حالت نمای دوپوسته و بدون استفاده از نمای دوپوسته نشان‌داده‌شده است. مشاهده می‌شود که باتوجه‌به نتایج مدل‌سازی، میزان سرمایش مصرفی درون ساختمان در بیشتر ماه‌های سال به جز ژانویه، جولای و آگوست در حالت استفاده از نمای دوپوسته کمتر از حالت ساده است. در تابستان به علت شدت تابش خورشیدی مناسب شهر بیرجند و نورگیری نمای دوپوسته، دما درون ساختمان بالا رفته و نیاز به مصرف سرمایش بیشتری جهت تهویه مطبوع مناسب درون ساختمان نیاز می‌باشد. به‌طورکلی می‌توان گفت که نمای دوپوسته بر روی میزان سرمایش مصرفی ساختمان تأثیر مثبت دارد.



شکل 7 نمودار سرمایش بر حسب ماه‌های مختلف سال

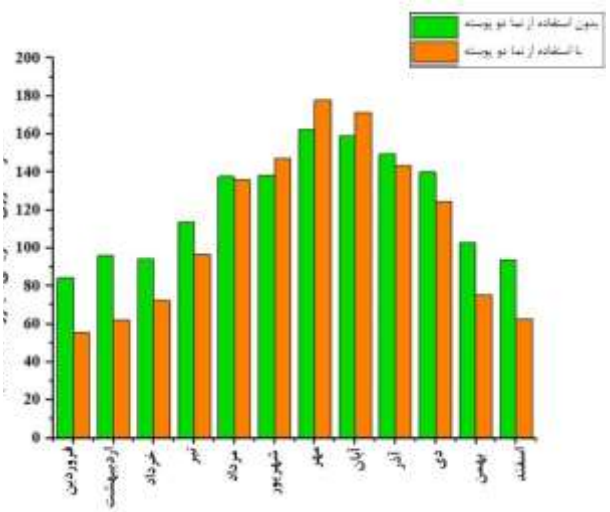
در شکل 8 میزان تولید انرژی الکتریکی توسط نمای دوپوسته (سلول-های خورشیدی شفاف) نشان‌داده‌شده است. مشاهده می‌شود که با استفاده از سلول‌های خورشیدی شفاف به‌طور میانگین در هر ماه می‌توان 30 کیلووات‌ساعت انرژی الکتریکی تولید کرد. سلول‌های خورشیدی برای تولید انرژی الکتریکی علاوه بر شدت تابش خورشیدی به جهت تابش و دما محیط نیز وابسته هستند و افزایش دما محیط باعث کاهش میزان تولید انرژی الکتریکی خواهد شد. از طرفی بیشترین میزان تولید انرژی الکتریکی در ماه-های فوریه، سپتامبر و اکتبر به 40 کیلووات‌ساعت نیز می‌رسد. از طرفی کمترین میزان تولید انرژی الکتریکی مربوط به ژوئن است که برابر با 25 کیلووات‌ساعت است.



شکل 8 نمودار میزان تولید انرژی الکتریکی توسط سلول‌های خورشیدی شفاف

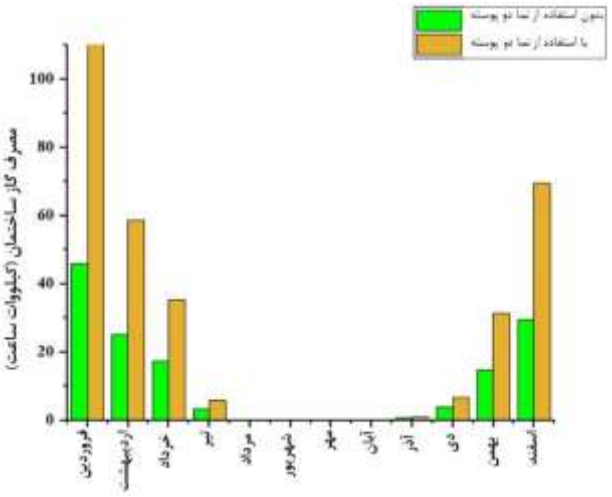
در شکل 9 نمودار الکتریسیته مصرفی ساختمان با استفاده از نمای دوپوسته و بدون استفاده از نمای پوسته لوله نشان‌داده‌شده است. مشاهده می‌شود که الکتریسیته در ماه‌های جولای و آگوست نسبت به حالت بدون استفاده از نمای دوپوسته بیشتر است؛ اما در دیگر ماه‌های سال الکتریسیته مصرفی ساختمان کمتر است. مصرف عمده الکتریسیته مصرفی ساختمان مربوط به سیستم‌های سرمایش و گرمایش است و باتوجه‌به اینکه نمای

دوپوسته قسمتی از نور خورشید را از خود عبور می‌دهد، سبب می‌شود تا سرمایش بیشتری در فصول تابستان نیاز باشد تا شرایط تهویه مطبوع ایده‌آل فراهم گردد.



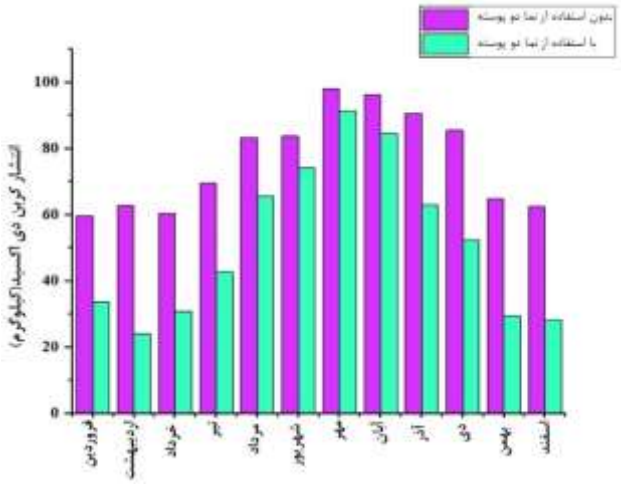
شکل 9 نمودار راندمان با استفاده از نمای دوپوسته و حالت ساده

در شکل 10 نمودار میزان گاز مصرفی ساختمان برای دو حالت استفاده از نمای دوپوسته و بدون استفاده از نمای دوپوسته نشان‌داده‌شده است. مشاهده می‌شود که به علت انتقال حرارت بیشتر نمای دوپوسته نسبت به استفاده از مصالح ساختمانی، میزان گاز مصرفی ساختمان با استفاده از نمای دوپوسته به‌ویژه در فصل زمستان و سرما بسیار بیشتر از حالت بدون استفاده از نمای دوپوسته است. همچنین بیشترین مصرف گاز در ماه ژانویه است که با استفاده از نمای دوپوسته تقریباً دوبرابر حالت بدون استفاده از نمای دوپوسته است.



شکل 10 نمودار میزان گاز مصرفی ساختمان با استفاده از نمای دوپوسته و بدون استفاده از نمای دوپوسته

در شکل 11 نمودار میزان انتشار کربن‌دی‌اکسید با استفاده از نمای دوپوسته و بدون استفاده از نمای دوپوسته نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که استفاده از نمای دوپوسته با تولید انرژی الکتریکی با به‌کارگیری سلول‌های خورشیدی سبب تأمین قسمتی از انرژی الکتریکی مصرفی ساختمان و از طرفی کاهش مصرف انرژی الکتریکی از شبکه سراسری برق خواهد شد. در نتیجه، میزان سوخت کمتری در نیروگاه‌ها برای تولید انرژی الکتریکی مصرف می‌شود که باعث کاهش انتشار آلایندگی خواهد شد.



شکل 11 نمودار میزان انتشار کربن‌دی‌اکسید با استفاده از نمای دوپوسته و بدون استفاده از نمای دوپوسته

4- بحث و نتیجه‌گیری

در عصر حاضر، تهویه مطبوع به یکی از مهم‌ترین موضوعات در ساختمان‌ها جهت آسایش ساکنان ساختمان تبدیل شده است. در این پژوهش، در شهر تهران و مطابق با شرایط آب‌وهوایی تهران در نرم‌افزار دیزاین بیلدر مدل‌سازی انجام گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر بیشتربودن میزان روشنایی درون ساختمان با استفاده از نمای دوپوسته است که این مورد یکی از مزایای مناسب استفاده از نمای دوپوسته به‌شمار می‌رود زیرا نمای دوپوسته می‌تواند قسمتی از نور را از خود عبور دهد؛ اما در حالت ساده، نور نمی‌تواند از دیوار ساختمان عبور کند. در مطالعهٔ خیاطیان و همکاران در سال 1399 اهمیت استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک بررسی شده و نتایج آن همسو با نتایج مطالعهٔ حاضر است به‌طوری‌که در پژوهش مذکور نیز به افزایش نرخ استفاده از این سیستم‌ها به‌عنوان نتایج پژوهش اشاره شده است زیرا از یک‌سو، با موضوع انرژی و مباحث انرژی‌های تجدیدپذیر همسو و هم‌راستا بوده و از سوی دیگر، تاثیر شگرفی بر ساختمان و بازدهی حرارتی آن دارد.

در مطالعهٔ وانگ و همکاران [1] [23] که به بررسی راهبرد سیستم‌های فتوولتائیک پرداخته‌اند، نتایج به‌دست‌آمده بیانگر این هستند که در صورت همسوبودن سیستم فتوولتائیک همسو با پیکرهٔ ساختمان و برخورداری از قابلیت انعطاف در شرایط مختلف، بهترین راندمان خروجی از سیستم قابل بهره‌برداری بوده و این مساله بر سازهٔ ساختمان نیز تاثیرگذار است. این مهم با نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش همسو بوده و بر همسوبودن و طراحی اصولی سیستم فتوولتائیک با ساختمان تاکید دارد.

[1] Wang et.al

از سوی دیگر، در مطالعهٔ سیدکیو و همکاران [1] [21] که به بررسی و ارزیابی عملکرد دیوار ترومب و نمای جنوبی به‌عنوان کاربردهای سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه ساختمان پرداخته‌اند، این‌طور بیان شده است که در صورت سازگاری سیستم‌های فتوولتائیک با طراحی ساختمان، هم باعث تقویت کاهش مصرف انرژی الکتریسیته شده و هم موجب کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار کربن دی‌اکسید می‌شود. این مطالعه با نتایج پژوهش حاضر هم‌راستا است.

در مطالعه لیو و همکاران در سال [22]، بهینه‌سازی سیستم‌های فتوولتائیک برای ساختمان‌های برخوردار از انرژی پاک مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه که با روش یادگیری ماشین و هوش مصنوعی انجام گرفته است، بیانگر این است که در صورت رعایت تناسب ساختمان دارای پوسته 3 لایه و همچنین سیستم فتوولتائیک با پیکره طراحی ساختمان، می‌توان بازدهی سیستم را تا 170 درصد افزایش داد، و در شرایط اجرایی و حداقلی، این عدد تا 70 درصد افزایش بازدهی سیستم را نشان داده است. این مهم با نتایج این پژوهش هم‌راستا است به‌طوری‌که، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که طراحی اصولی سیستم فتوولتائیک، کاهش مصرف انرژی و افزایش تهویه متبوع و پیش‌گیری از برون‌دهی انرژی را به‌همراه دارد.

به‌طور کلی، با استفاده از نمای دوپوسته، دمای داخل ساختمان به‌علت انتقال حرارت بیشتر نمای دوپوسته نسبت به حالت بدون استفاده از نمای دوپوسته به‌طور میانگین در هر ماه دو درجه سانتی‌گراد کمتر است. همچنین، میزان سرمایش مصرفی درون ساختمان در بیشتر ماه‌های سال به‌جز ماه‌های ژانویه، جولای و آگوست، در حالت استفاده از نمای دوپوسته کمتر از حالت ساده است. در فصل تابستان، به‌علت شدت تابش خورشیدی مناسب شهر بیرجند و نورگیری نمای دوپوسته، دمای درون ساختمان بالا رفته و نیاز به مصرف سرمایش بیشتری جهت تهویه مطبوع مناسب درون ساختمان است. به‌طورکلی می‌توان گفت که نمای دوپوسته تأثیر مثبتی بر میزان سرمایش مصرفی ساختمان دارد. از سویی دیگر، با استفاده از سلول‌های خورشیدی شفاف، در هر ماه به‌طور میانگین می‌توان 30 کیلووات ساعت انرژی الکتریکی تولید کرد. سلول‌های خورشیدی برای تولید انرژی الکتریکی، علاوه بر شدت تابش خورشیدی به جهت تابش و دمای محیط نیز وابسته هستند و افزایش دمای محیط باعث کاهش میزان تولید انرژی الکتریکی خواهد شد. عمدهٔ مصرف الکتریسیته مصرفی ساختمان مربوط به سیستم‌های سرمایش و گرمایش است و با توجه به این‌که نمای دوپوسته قسمتی از نور خورشید را از خود عبور می‌دهد، این امر باعث افزایش نیاز به سرمایش در فصول تابستان به‌منظور فراهم‌کردن شرایط تهویه مطبوع ایده‌آل می‌شود. با توجه به انتقال حرارت بیشتر نمای دوپوسته نسبت به استفاده از مصالح ساختمانی، میزان گاز مصرفی ساختمان با استفاده از نمای دوپوسته به‌ویژه در فصل زمستان و ماه‌های سرد بسیار بیشتر از حالت بدون استفاده از نمای دوپوسته است. استفاده از نمای دوپوسته از طریق تولید انرژی الکتریکی با استفاده از سلول‌های خورشیدی، از یک‌سو باعث تأمین قسمتی از انرژی الکتریکی مصرفی ساختمان شده و از سویی دیگر، منجر به کاهش مصرف انرژی الکتریکی از شبکه سراسری برق خواهد شد. در نتیجه، میزان سوخت کمتری در نیروگاه‌ها برای تولید انرژی الکتریکی مصرف می‌شود که باعث کاهش انتشار آلایندگی خواهد شد.

[1] Siddique et.al

5- مراجع

[1] M. Rasouli, Y. Shahbazi, and M. R. Matini, Horizontal and Vertical Movable Drop-Down Shades Performance in Double Skin Facade of Office Buildings; Evaluation and Parametric Simulation, Naqshejahan, Vol. 9, No. 2, pp. 135–144, 2019. (in Persian)

[2] N. Skandalos and D. Karamanis, PV glazing technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 49, pp. 306–322, 2015.

[3] Z. Keshavarz, M. Taban, and M. Mehrakizadeh, Evaluation of natural ventilation in a corridor double skin façade (case study office building in Shiraz), Sustainable Architecture and Urban Design, Vol. 5, No. 1, pp. 15–28, 2017. (in Persian)

[4] S. Nourivand, L. Balilan, and M. Asefi, Assessment of the impacts of increasing cavity depth and floor numbers on energy performance of different types of double skin facade in Office Buildings of Cold Climate in 36 Different Scenarios (case study an office building in Tabriz), Journal of Environmental Science and Technology, Vol. 23, No. 7, pp. 1–19, 2021.

[5] N. Gupta and G. N. Tiwari, Effect of heat capacity on monthly and yearly exergy performance of building integrated semitransparent photovoltaic thermal system, Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 9, No. 2, 2017.

[6] A. Ghaffarianhoseini, A. Ghaffarianhoseini, U. Berardi, J. Tookey, D. H. W. Li, and S. Kariminia, Exploring the advantages and challenges of double-skin façades (DSFs), Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 60, pp. 1052–1065, 2016.

[7] E. Gratia and A. De Herde, Are energy consumptions decreased with the addition of a double-skin?, Energy and Buildings, Vol. 39, No. 5, pp. 605–619, 2007.

[8] M. A. Shameri, M. A. Alghoul, K. Sopian, M. F. M. Zain, and O. Elayeb, Perspectives of double skin façade systems in buildings and energy saving, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, No. 3, pp. 1468–1475, 2011.

[9] R. Charron and A. K. Athienitis, Optimization of the performance of double-façades with integrated photovoltaic panels and motorized blinds, Solar Energy, Vol. 80, No. 5, pp. 482–491, 2006.

[10] B. J. Brinkworth, B. M. Cross, R. H. Marshall, and H. Yang, Thermal regulation of photovoltaic cladding, Solar Energy, Vol. 61, No. 3, pp. 169–178, 1997.

[11] G. Gan, Effect of air gap on the performance of building-integrated photovoltaics, Energy, Vol. 34, No. 7, pp. 913–921, 2009.

[12] J. Peng, D. C. Curcija, L. Lu, S. E. Selkowitz, H. Yang, and W. Zhang, Numerical investigation of the energy saving potential of a semi-transparent photovoltaic double-skin facade in a cool-summer Mediterranean climate, Applied Energy, Vol. 165, pp. 345–356, 2016.

[13] J. Peng, D. C. Curcija, L. Lu, S. E. Selkowitz, H. Yang, and R. Mitchell, Developing a method and simulation model for evaluating the overall energy performance of a ventilated semi-transparent photovoltaic double-skin facade, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 24, No. 6, pp. 781–799, 2015.

[14] J. Peng, L. Lu, and H. Yang, An experimental study of the thermal performance of a novel photovoltaic double-skin facade in Hong Kong, Solar Energy, Vol. 97, pp. 293–304, 2013.

[15] C. Lee, H. Lee, M. Choi, and J. Yoon, Design optimization and experimental evaluation of photovoltaic double skin facade, Energy and Buildings, Vol. 202, pp. 109–314, 2019.

[16] N. Ziasistani and F. Fazelpour, Comparative study of DSF, PV-DSF and PV-DSF/PCM building energy performance considering multiple parameters, Solar Energy, Vol. 187, pp. 115–128, 2019.

[17] Y. B. Yoon, B. Seo, B. B. Koh, and S. Cho, Performance analysis of a double-skin façade system installed at different floor levels of high-rise apartment building, Journal of Building Engineering, Vol. 26, pp. 100–900, 2019.

[18] B. Alijani and M. Ahmadi, Determining the comfort level of Tehran city, Persian language and literature, Vol. 9, No. 3, pp. 127–143, 1995.

[19] S. Y. Safavi, Investigation of geographical factors in air pollution in Tehran, Geographical researches (not published), Vol. 6, No. 38, 2007. (in Persian)
[20] M. Saligheh, Climate change and climate risks in Tehran, Climate Change and Climate Hazards, Vol. 2, No. 3, pp. 15–32, 2014. (in Persian)
[21] M. Siddique, N. Shahzad, S. Umar, A. Waqas, S. Shakir, and A. Kashif Janjua, Performance assessment of Trombe wall and south façade as applications of building integrated photovoltaic systems, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 57, pp. 103–141, 2023.
[22] W. Liu et al., Machine learning applications for photovoltaic system optimization in zero green energy buildings, Energy Reports, Vol. 9, pp. 2787–2796, 2023.
[23] T. Wang, K. Chen, X. Hu, P. Liu, Z. Huang, and H. Li, Research on coordinated control strategy of photovoltaic energy storage system, Energy Reports, Vol. 9, pp. 224–233, 2023.
[24] H. M. Maghrabie, K. Elsaid, E. T. Sayed, M. A. Abdelkareem, T. Wilberforce, and A. G. Olabi, Building-integrated photovoltaic/thermal (BIPVT) systems: Applications and challenges, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 45, pp. 101–151, 2021.